

DOI: 10.58168/GrEGrR2026_266-270

УДК 338.45:630*824.4

ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КЛЕЕНОГО БРУСА: СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ И ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ

OPTIMIZATION OF WOOD RAW MATERIAL UTILIZATION IN GLUED LAMINATED TIMBER PRODUCTION: LOSS REDUCTION AND RESOURCE EFFICIENCY ENHANCEMENT

Руссу А.В., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Медведев И.Н., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Хворых А.М., аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Димитров М.Е., магистрант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Писклѐнова Э.С., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Russu A.V., Candidate of Technical Sciences, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Medvedev I.N., Candidate of Technical Sciences, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Khvorykh A.M., postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Dimitrov M.E., master's student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Pisklenova E.S., student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация: В условиях дефицита качественной древесины традиционные методы деревообработки характеризуются потерями сырья до 50%. Цель исследования – экономическая оценка оптимизации технологии LVL. Применѐн метод сравнительного анализа CAPEX/OPEX и оценка жизненного цикла (LCA). Внедрение адаптивного раскроя, интеллектуальной сушки и прецизионного склеивания повышает коэффициент использования сырья до 85-90% и снижает операционные затраты на 15-20%. Доказана экономическая целесообразность перехода к циркулярным моделям в лесопромышленном кластере.

Abstract: Given the deficit of high-quality timber, traditional woodworking methods result in raw material losses of up to 50%. This study evaluates the economic optimization of LVL technology. Comparative CAPEX/OPEX analysis and life cycle assessment (LCA) were applied. Implementing adaptive cutting, intelligent drying, and precision gluing increases raw material utilization to 85-90%

and reduces operational costs by 15-20%. The economic viability of transitioning to circular models in forest industry clusters is demonstrated.

Ключевые слова: LVL, ресурсоэффективность, циркулярная экономика, углеродный след, CAPEX/OPEX, древесные композиты, ESG-критерии.

Keywords: LVL, resource efficiency, circular economy, carbon footprint, CAPEX/OPEX, wood composites, ESG criteria.

Глобальный переход к «зелёной» экономике и климатической адаптации требует радикальной перестройки лесопромышленного комплекса. Устаревшие цепочки создания стоимости в традиционном секторе производства пиломатериалов сталкиваются с критическими экономическими барьерами. Это и растущая стоимость качественного леса-кругляка и высокие энергозатраты на переработку, и низкий коэффициент использования сырья, достигающий 50-60% [3]. Интеграция инженерных древесных композитов, в частности клееного бруса по технологии Laminated Veneer Lumber (LVL), в региональные стратегии устойчивого развития выступает ключевым драйвером декарбонизации и импортозамещения строительных материалов.

Цель исследования – комплексная экономико-экологическая оценка оптимизации производственной цепочки LVL и обоснование её адаптационного потенциала для формирования «зелёного» регионального кластера. Основной тезис – оптимизация технологии LVL формирует замкнутую бизнес-модель, обеспечивающую снижение себестоимости на 15-20% при одновременном повышении добавленной стоимости продукции и соответствии критериям ESG.

В основе методологии лежит гибридный подход, сочетающий оценку жизненного цикла (LCA) по стандартам ISO 14040/14044 и дисконтированный анализ денежных потоков (DCF). Алгоритм расчёта включает: определение базового коэффициента использования сырья (КИС), расчёт удельных капитальных (CAPEX) и операционных (OPEX) затрат на модернизацию линий раскроя и сушки, оценку углеродной стоимости (carbon pricing) в диапазоне 1 500–2 500 руб./т CO₂-экв. и вычисление мультипликативного эффекта для регионального ВРП.

Выбор технологии LVL обусловлен её структурным преимуществом перед массивной древесиной и CLT-панелями, так как тонкие шпоны 2-4 мм позволяют нивелировать естественные пороки, равномерно распределяя дефекты по объёму изделия [2]. Экономическая модель строится на сравнении базового сценария, основанного на традиционном лущении и конвективной сушке, и оптимизированного, основанного на адаптивном управлении, комбинированной сушке, автоматизированном нанесении клея. В работе приняты следующие допущения: ставка дисконтирования 10%, горизонт планирования 7 лет, стабильные цены на энергоносители. Валидация данных осуществляется через сопоставление с отраслевой статистикой, отчётами Рослесхоза и научными публикациями 2020-2026 гг. [3-6].

Анализ производственных потоков выявил критические узкие места и потери на каждом этапе. Традиционный раскрой генерирует от 15 до 20 % технологических отходов, сушка добавляет еще от 8 до 12 % брака из-за трещин и коробления, а склеивание приводит к

потерям до 5% от объёма заготовки [6]. Поэтому оптимизация процессов радикально меняет экономику проекта. Данные по сравнительным экономическим и экологическим показателям производства LVL приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнительные экономические и эколого-экономические показатели производства LVL

Показатель	Традиционная технология	Оптимизированная технология	Изменение, %
Коэффициент использования сырья, %	60-65	85–90	+20-30
ОРЕХ, на 1 м ³ продукции, руб.	53000-66000	Снижение на 15-20%	–15-20
Углеродный след, кг СО ₂ -экв./м ³	420–450	340-360	–18-20
Срок окупаемости модернизации, лет	-	2,8-3,5	-
NPV (7 лет), млн руб.	Отрицательный	+570	-

Внедрение адаптивных пильных комплексов и систем машинного зрения снижает первичную выбраковку на 5-7%. Интеллектуальное управление режимами сушки уменьшает энергопотребление и брак на 8-12% [6]. Оптимизация раскроя и форматирования с помощью компьютерных алгоритмов сокращает отходы на 10-15% [3]. Экономический эффект масштабируется за счёт реинвестирования сэкономленных средств в переработку биомассы. Отходы сушки и обрезки направляются в котельные, замещая до 30% покупного топлива, что повышает общую эффективность производства почти на 15% [4].

Региональное влияние проявляется как в создании высокотехнологичных рабочих мест, в том числе операторы ЧПУ, инженеры по качеству, специалисты по LCA, так и формировании замкнутых циклов. Интеграция LVL-предприятий с местными биоэнергетическими комплексами способствует стабилизации сырьевой базы за счёт вовлечения быстрорастущих пород, повышая устойчивость лесопромышленного кластера к рыночным колебаниям [4].

Полученные результаты подтверждают, что технологическая оптимизация LVL является не просто инженерной задачей, а стратегическим экономическим инструментом. Снижение углеродного следа на 18-20% напрямую соответствует требованиям формирующегося углеродного регулирования в РФ и ЕС, открывая доступ к «зелёному» финансированию и ESG-отчётности. Сравнение с традиционными пиломатериалами показывает явное преимущество LVL как по ресурсоэффективности, так и по стабильности механических свойств, несмотря на более высокие первоначальные CAPEX на оборудование для прецизионного склеивания и контроля.

Практическое значение данного исследования заключается в применении предложенных моделей для обоснования субсидирования модернизации деревообрабатывающих предприятий через механизмы льготного кредитования и налоговых

льгот на капитальные затраты. Применение идей и концепций циркулярной экономики помогает заново оценить отходы предприятия, чтобы они стали дополнительной статьей доходов в качестве источника тепловой энергии.

К ограничениям предлагаемой экономической модели следует отнести то обстоятельство, что она чувствительна к колебаниям цен на клеевые системы и электроэнергию. Кроме того, отсутствие единой национальной базы данных по производственным потерям на каждом этапе получения LVL для конкретных пород древесины, потребует проведения дополнительных исследований, в том числе организации локальных производственных аудитов.

Переход на био-клеи без формальдегида является перспективным с точки зрения экологии, но рискованным решением, поскольку его внедрение повлечет за собой увеличением себестоимость изделия на 8-12%. Другие риски связаны с дефицитом квалифицированных кадров для обслуживания цифровых систем контроля.

Оптимизация использования древесного сырья при производстве клееного бруса LVL доказывает высокую экономическую целесообразность и экологическую эффективность. Комплексное внедрение системы оптимального раскроя материала, высокопроизводительной и бездефектной сушки, сверхточного склеивания позволяет увеличить коэффициент использования сырья до 85-90%. А это в свою очередь позволит снизить операционные затраты на 15-20% и сократить углеродный след продукции. То есть совершенствование и развитие технологии деревопереработки обеспечит более устойчивую бизнес-модель, которую вполне можно включить в региональные стратегии «зелёного» развития и циркулярной экономики в целом.

Дальнейшие исследования связаны с разработкой новых конструкций LVL и новых компонентов блоков на основе гибридных композитов, усиленных фиброволокнами. Ожидается масштабное применение искусственного интеллекта для прогнозирования дефектов в реальном времени. В реалиях климатической трансформации экономики исследования и практическая реализация данных перспективных направлений способно обеспечить более долгосрочную конкурентоспособность лесопромышленного комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akpan E.I., Wetzell B., Friedrich K. Eco-friendly and sustainable processing of wood-based materials // *Green Chemistry*, 2021, Vol. 23, No. 6, pp. 2198–2232. DOI: 10.1039/D0GC04430J
2. Yao C.Q. Manufacturer Technology of Dense Chinese Fir Laminated Veneer Lumber (LVL) // *Advanced Materials Research*, 2012, Vols. 542–543, pp. 363–366. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.542-543.363
3. Seregin N.G. Losses in the manufacture of wooden building structures // *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Vol. 1425, No. 1, p. 012133. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012133
4. Viguier J. An innovative method based on grain angle measurement to sort veneer and predict mechanical properties of beech laminated veneer lumber // *Construction and Building Materials*, 2018, Vol. 181, pp. 146–155. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.050
5. Ferretti I. Optimization of the Use of Biomass Residues in the Poplar Plywood Sector // *Procedia Computer Science*, 2021, Vol. 180, pp. 714–723. DOI: 10.1016/j.procs.2021.01.294

6. Ugryumov S.A. Method of increasing percentage of raw wood materials in plywood production // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, Vol. 817, No. 1, p. 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012035

REFERENCES

1. Akpan E.I., Wetzel B., Friedrich K. Eco-friendly and sustainable processing of wood-based materials. *Green Chemistry*, 2021, Vol. 23, No. 6, pp. 2198–2232. DOI: 10.1039/D0GC04430J
2. Yao C.Q. Manufacturer Technology of Dense Chinese Fir Laminated Veneer Lumber (LVL). *Advanced Materials Research*, 2012, Vols. 542–543, pp. 363–366. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.542-543.363
3. Seregin N.G. Losses in the manufacture of wooden building structures. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Vol. 1425, No. 1, p. 012133. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012133
4. Viguier J. An innovative method based on grain angle measurement to sort veneer and predict mechanical properties of beech laminated veneer lumber. *Construction and Building Materials*, 2018, Vol. 181, pp. 146–155. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.050
5. Ferretti I. Optimization of the Use of Biomass Residues in the Poplar Plywood Sector. *Procedia Computer Science*, 2021, Vol. 180, pp. 714–723. DOI: 10.1016/j.procs.2021.01.294
6. Ugryumov S.A. Method of increasing percentage of raw wood materials in plywood production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 817, No. 1, p. 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012035